

I-A140 外圧を受ける円筒サンドイッチシェルの弾性座屈下限値について

愛媛大学工学部 正 員 大賀 水田生
不 動 建 設 山田 勝 己
愛媛大学大学院 中村 大 輔

1. はじめに

本研究では、サンドイッチ断面を有する円筒シェル構造(円筒サンドイッチシェル)が外圧を受ける場合について、まずその古典的座屈強度の算定式について述べ、さらに円筒サンドイッチシェルの初期不整によるばらつきを考慮した座屈強度すなわち座屈下限値を Reduced Stiffness 法に基づいてを理論的に推察する方法について述べるとともに、本解析法により得られた座屈強度(RS座屈強度)について基本的な考察を行う。

2. 外圧を受ける円筒サンドイッチシェルの古典的座屈強度

外圧 q を受ける円筒サンドイッチシェルの座屈時のひずみエネルギー U 及び外力による仕事 W は次のように表される(図-1)。

$$U = (1/2) \iiint [\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_s \varepsilon_s + \tau_{xs} \gamma_{xs} + \tau_{x\zeta} \gamma_{x\zeta} + \tau_{s\zeta} \gamma_{s\zeta}] ds dx d\zeta, \quad W = (q/2) \iint (aw_s^2) ds dx = qU_E \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_x, \sigma_s, \tau_{xs}, \varepsilon_x, \varepsilon_s, \gamma_{xs}$: 表面材に生じる応力およびひずみ、 $\tau_{x\zeta}, \tau_{s\zeta}, \gamma_{x\zeta}, \gamma_{s\zeta}$: 心材に生じるせん断応力およびせん断ひずみ、 w : 面外変位。

式(1)に応力-ひずみ関係式を代入し、トータルポテンシャルエネルギーの停留条件を適用することにより次式を得る。

$$U - q_c U_E = 0, \quad U = U_M + U_B + U_S \quad (2)$$

ここに、 $U_M = U_{M1} + U_{M2} + U_{M3}$: 面内エネルギー成分、 $U_B = U_{B1} + U_{B2} + U_{B3}$: 曲げエネルギー成分、 $U_S = U_{S1} + U_{S2}$: せん断エネルギー成分、 q_c : 古典的座屈強度、添字 1, 2, 3 はそれぞれ部材軸方向(x 方向)、円周方向(s 方向)および $x-s$ 方向成分であることを示している。

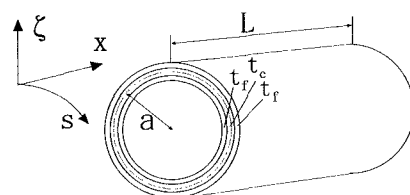


図-1 円筒サンドイッチシェル

3. 外圧を受ける円筒サンドイッチシェルのRS座屈強度

RS法は初期不整の影響によって容易に消失するであろうひずみエネルギー成分すなわち面内ひずみエネルギー U_M を予め削除し座屈荷重を求める方法である。したがって、式(2)より次式が成立する。

$$U_B + U_S - q_c^* U_E = 0, \quad q_c^* : \text{RS 座屈強度} \quad (3)$$

式(2)、(3)より、RS座屈強度が古典的座屈強度 q_c により次のように求められる。

$$q_c^* = q_c (U_B + U_S) / (U_M + U_B + U_S) \quad (4)$$

4. 外圧を受ける円筒サンドイッチシェルのひずみエネルギーおよびRS座屈強度

図-2(a~c)に円筒サンドイッチシェル(図-1: $a=100\text{cm}$, $L/a=2$, $t_r=0.2\text{cm}$, $t_c=1.2\text{cm}$, $G_c=1000, 5000, \infty \text{kgf/cm}^2$)が外圧を受ける場合の円周方向座屈モード n に対する全ひずみエネルギー U 及び3種類のエネルギー成分 U_M , U_B , U_S のスペクトルを示している。図-2(a)より明らかなように $G_c=1000\text{kgf/cm}^2$ の場合、全

円筒シェル, サンドイッチシェル, reduced stiffness 法, 座屈荷重, 初期不整

〒790-8577, 松山市文京町3 愛媛大学工学部 環境建設工学科, TEL:089-927-9816, FAX:089-927-9840

ひずみエネルギー U は円周方向座屈モード n の増加とともに減少し、 $n=4$ 付近で最小値をとり、その後増大している。面内ひずみエネルギー U_M は円周方向座屈モード n の増加とともに減少しているのに対し、曲げ及びせん断ひずみエネルギー U_B , U_S は n の増加とともに大きくなる傾向を示している。ところで、古典的座屈強度 q_c (一点鎖線) は円周方向座屈モード $n=6.0$ で得られており ($q_c=8.17 \text{ kgf/cm}^2$)、この場合の各エネルギー成分の全ひずみエネルギー U に占める割合は $U_M=0.108$, $U_B=0.410$, $U_S=0.482$ となっている。したがって、この場合の RS 座屈強度は式 (4) を用いて次のように決定される。

$$q_c^* = (U_B + U_S) / (U_M + U_B + U_S) q_c$$

$$= 0.892 q_c = 7.29 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$G_c=5000, \infty \text{ kgf/cm}^2$ の場合も $G_c=1000 \text{ kgf/cm}^2$ の場合と同様な傾向が得られている。なお、図-2 にはそれぞれの座屈モード n に対して求められた RS 座屈強度 (二点鎖線) も同時に示しているが、RS 座屈強度は n の増大とともに大きくなり、古典的座屈強度に漸近する傾向を示している。

5. 心材の厚さが古典的座屈強度および RS 座屈強度に及ぼす影響

図-3 に古典的座屈強度および RS 座屈強度と心材厚との関係を、縦軸にはそれぞれの座屈強度をシェル厚 $t=2t_f$ を有する通常の断面を有する円筒シェルの古典的座屈強度 q_0 で除した値をとり示している。せん断弾性係数 $G_c=1000, 5000 \text{ kgf/cm}^2$ において、心材厚が小さい範囲では $q_c/q_0 < 1$ となっており、この範囲では円筒サンドイッチシェルの座屈強度は、通常の円筒シェルに比較して小さくなっている。しかしながら、 t_c の増加とともにいずれの座屈強度も増大している。図-3 には、RS 座屈強度の古典的座屈強度に対する比 q_c^*/q_c を一点鎖線で示している。 $G_c=1000, 5000 \text{ kgf/cm}^2$ での q_c^*/q_c は t_c の小さな範囲 ($t_c < 0.5 \text{ cm}$) を除いて、 t_c の増加とともに増大しているが、 $G_c=\infty$ での q_c^*/q_c は不規則な挙動を示している。

6. おわりに

本研究では、円筒サンドイッチシェルが外圧を受ける場合の古典的座屈強度の算定式、および初期不整によるばらつきを考慮した座屈下限値を理論的に推察する方法として Reduced Stiffness 法について述べた。今後、実験結果や FEM 非線形解析結果等との比較を通じて、本解析法の妥当性、有用性について検討する必要がある。

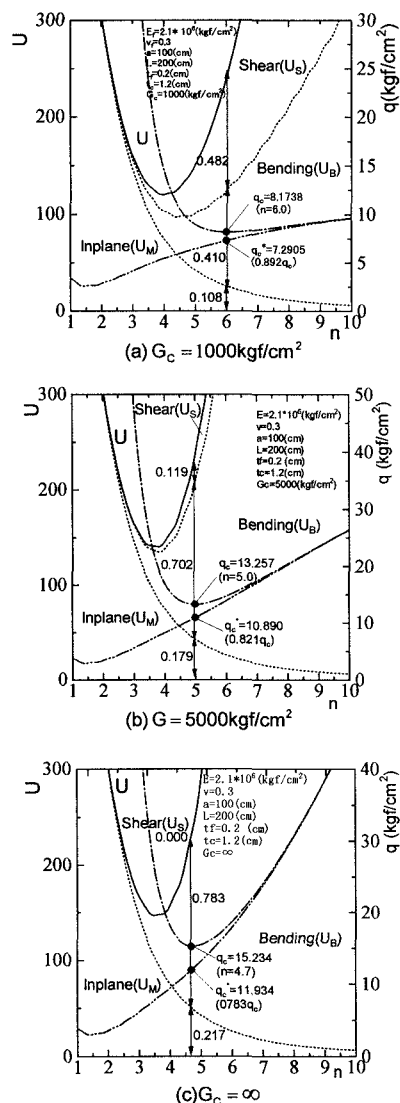


図-2 エネルギー成分と RS 座屈強度

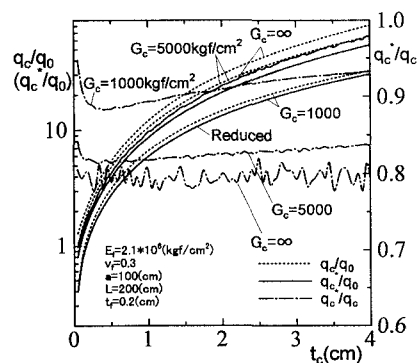


図-3 心材厚の RS 座屈強度に及ぼす影響